
原 著 論 文

アスリートの外傷と運動学習能力の関係に関する予備的検討

大須 理英子¹⁾, 早川 梨香子¹⁾, 古賀 敬之¹⁾,
平山 健人¹⁾, 江川 陽介²⁾

Relation between sports injuries and motor adaptation ability - preliminary study -

Rieko Osu¹⁾, Rikako Hayakawa¹⁾, Takayuki Koga¹⁾, Kento Hirayama¹⁾, Yousuke Egawa²⁾

¹⁾Faculty of Human Sciences, Waseda University

²⁾Kokushikan University Faculty of Letters)

(Received : April 22, 2020; Accepted: September 02, 2020)

Abstract

Sports injuries hinder athletes from training, resulting in a decline in fitness and sport performance. Various exercises have been proposed that improve neuromuscular control, to reduce the risk of injuries. However, they cannot yet perfectly prevent injuries. The aim of this study is to explore a novel approach to injury prevention, through examining the relationship between motor adaptation ability and injury records. Seventeen Judo athletes from the Waseda University Judo club participated in the study. The participants performed a reaching task with their non-dominant hand in a visuomotor rotation environment. The position of the fingertips was measured by sensors and displayed on a computer screen as a cursor with or without 60 degrees clockwise rotation transformation. Their adaptation performances during the rotation were compared with their injury records of the past 3.5 years. The magnitude of adaptation errors significantly correlated with the ratio of injuries caused by internal factors, such as their bad form, but not with the ratio of injuries caused by external factors, such as a disturbance from an opponent, nor the number of injuries per year. The adaptation to visuomotor transformation has been shown to be related to the cerebellum motor learning system called the internal model. Therefore, the results suggest that the better the cerebellum motor learning ability is, the smaller the ratio of the injury caused by internal factors. Exercises focusing on improving the cerebellum internal model system may help to reduce injury risk.

Key Words : cerebellum, visuomotor transformation, athlete, motor learning, injury prevention

¹⁾ 早稲田大学人間科学学術院 (Faculty of Human Sciences, Waseda University)

²⁾ 国士舘大学文学部 (Kokushikan University Faculty of Letters)

1. はじめに

競技スポーツにおいて、外傷は、アスリートの運動継続を阻害し、選手生命に深刻な影響を及ぼす要因の一つである。練習の中断を余儀なくされるだけでなく、治癒後の競技力や心理的側面にも影響を及ぼすため、予防することが大切である。スポーツ傷害予防は、近年注目されており^{1,2}、例えば、Soligard ら³は、機能的に体を使えるようにするエクササイズを運動前に継続することで、若手女性サッカー選手における重篤な急性外傷や慢性障害が有意に予防できることを明らかにした。これらのウォーミングアップエクササイズのプログラムは、関節の位置感覚や安定性、伸長反射や屈曲反射をはじめとする外部からの刺激に対する防御反応を向上させることで外傷を予防すると考えられている^{1,4,6}。これらは、主に、運動器の神経筋機能の改善に注目したプログラムであると考えられる。しかし、これらのプログラムを実施しても、外傷を完全に予防することは難しい。

運動機能や運動学習には、脳の制御・学習機能が深く関わっている。特に、小脳と運動学習機能には深い関わりがあり、感覚運動変換に対する適応に関連していることが、脳機能イメージング⁷や小脳疾患患者例の研究⁸で明らかにされている。Hashimotoら⁹は、プリズム適応課題により、小脳疾患患者では健常者より運動学習能力が低下していること、さらに、健常者においても、若年より高齢者において運動学習能力が低下していることを明らかにしている。小脳疾患患者では、手先が不器用になるといった巧緻運動障害や、歩行障害が観察されること、また高齢者になると運動技能が低下することから、小脳の学習能力がスポーツの技能にも深く関係することが示唆される^{10,11}。しかし、アスリートの外傷と小脳の運動学習能力の関係について検討した研究は例がない。

そこで、本研究では、運動学習課題としてよく使われる回転カーソル課題^{12,13}を利用し、アスリートの外傷記録との関係を検討する。この課題では、マウスを傾けて操作してしまったときのように、視覚提示されるカーソル位置と手先の位置の関係の間に回転変換が加えられる。最初は視覚提示されるターゲットに到達することができないが、練習しているうちに変換を学習し、到達できるようになる。本研

究により、視覚運動変換を学習する能力と外傷との間に関係がある可能性が示唆されれば、外傷の予防に対する新たなアプローチを検討する手がかりとなるだろう。

2. 方法

2.1 対象者

早稲田大学体育会柔道部に所属する学生17名（男性13名、女性4名、 21.5 ± 1.4 歳、競技歴 14.7 ± 1.6 年、右利き）。外傷の調査期間内に1年以上在籍し、外傷の調査対象期間が1年以上の学生を対象とした。調査期間は2015年12月1日から2019年5月31日までとした。外傷あるいは手術後のリハビリテーションに伴い、6ヶ月以上の競技離脱があった場合、その期間は調査期間対象外とした。対象者には、事前に実験への参加と外傷調査記録の使用についての同意を得た。

対象者として早稲田大学柔道部を選択した理由は以下の2点である。1点目は、柔道が、外傷が多く発生する競技でありながら、その要因が比較的限定的である点である。競技特性上、ハードなコンタクトスポーツであり、多数の外傷が発症する一方で、屋内競技でありかつユニフォーム以外に道具を用いないため、用具や天候といった環境に左右される外傷が発生しにくい。外傷の要因は、ほぼ、競技者の競技動作、すなわちスキルに限られるといつてよい¹⁴。2点目は、公益財団法人日本スポーツ協会が認めるアスレティックトレーナーによって、運動器の機能改善を図るエクササイズが処方されていることである。選手それぞれに適したエクササイズが処方され、実践されているにも関わらず、外傷が多く発生していることから、運動器の改善では予防しきれない要素を検討する母集団として適切であると考えられる。

2.2 外傷調査

2015年12月1日から2019年5月31日までの調査期間内の練習時及び試合時に発症した全ての外傷を評価し記録、対象者の1年あたりの外傷発生件数を算出した。外傷評価は、アスレティックトレーナーのテキスト^{15,16}に記載の評価方法に基づき、学生トレーナー4名が評価し、それをさらに経験豊富な公認アスレティックトレーナー資格所有者が再評価して修正した。医療機関（整形外科）を受診した場合は、

医師による診断も記載に含んでいる。また、外傷内容の記録から、発生要因を、自身のフォームの乱れに起因するもの（内的要因）、対戦相手の外乱に起因するもの（外的要因）、どちらの要因か判然としないもの（負荷が繰り返しかかることによる慢性障害を含む）に分類し、その比率を算出した。

2.3 実験課題

回転カーソルを用いたリーチ課題を用いて運動学習能力を評価した。回転カーソルとは、回転変換を入れて、わざと操作しにくくしたカーソルのことである。本実験では、実際の手先位置と表示されるカーソルの間に時計回りに 60° の回転変換を導入する。ディスプレイ上にランダムに提示されるターゲットに対する、カーソルのリーチ誤差を評価した。

参加者は上に鏡を設置した作業台の前に座る（図1左）。参加者の腕は鏡で遮られ、視界には、鏡の上に設置された下向きの液晶ディスプレイの映像が映る。参加者は鏡に映る映像を見ながら作業するように指示される。鏡に対してディスプレイと作業台が等距離にあるため、参加者は手先を示すカーソルと実際の手先が同じ面にあるように感じる。手先位置は、第2指遠位端の上に取り付けた磁気式の位置センサー（FASTRAK, Polhemus社）によって60Hzで記録され、カーソル（黒い点）を介して参加者にフィードバックされる。作業台の正中線上に2つの圧力センサーを配置し、両手で同時に圧力センサーを押すと直径2cmのターゲット円が表示される。ターゲットは、ディスプレイ上の5か所にランダムに表示される（図1右）表示位置は、左右の圧力センサーの中心とする半径27cmの円弧上のターゲットCを中心に、左右に $\pm 8^\circ$ （ターゲッ

トB, D), $\pm 15^\circ$ （ターゲットA, E）回転させた点とする。ターゲット円が表示されたら、できるだけ速くターゲットにリーチするように教示された。ターゲット提示から550ms以内にターゲット円に到達した試行を成功とした。学習による変化が検出しやすい非利き手（全参加者左手）を回転変換の対象とした。

2.4 実験手続き

参加者はまずリーチ課題に慣れるため、利き手（右）、非利き手（左）それぞれで、直近10回の成功率が50%を超えるまで練習を行なった。その後、以下の順で学習課題を実施した（表1）。まず、リーチ課題のパフォーマンスを確認するため回転変換なしで、利き手、非利き手の順で30試行実施した（pre_D_NR, pre_ND_NR）。その後、非利き手に時計回り 60° の変換を導入した試行を100回行なった（training1_ND_R）。その後、非利き手に回転変換を加えない試行を100回実施し、獲得した変換をウォッシュアウトさせた（training2_ND_NR）。さらに、非利き手に時計回り 60° の変換を再度導入し、再学習させた（training3_ND_R）。最後に、利き手への影響を確認するため、利き手で変換を加えない試行を50回実施した（post_D_NR）。

表1 実験手続き

section名	手	回転変換の有無	trial数
pre_D_NR	利き手	変換なし	30
pre_ND_NR	非利き手	変換なし	30
training1_ND_R	非利き手	変換あり	100
training2_ND_NR	非利き手	変換なし	100
training3_ND_R	非利き手	変換あり	100
post_D_NR	利き手	変換なし	50

D: 利き手 ND: 非利き手 R: 変換あり NR: 変換なし

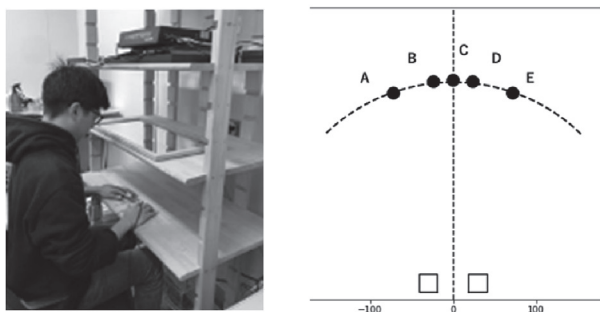


図1 実験設定

左：実験装置 右：鏡に映るディスプレイ上に提示される課題。□が始点、●がターゲット位置を示す(mm)。

2.5 解析

各試行においてターゲットに対するカーソル軌道の回転誤差を算出した。手先が力センサーから離れた時点の位置を始点とし、その時点から200ms後の手先位置と始点を作るベクトルと、始点とターゲット位置を作るベクトルの間の角度を回転誤差とした。時計回り方向の角度を正とした。

回転変換課題においては、誤差は指数関数的に減少し、学習の後半では誤差がゼロに近づくことが知られている¹²。そこで、運動学習能力の指標とし

て、各セクションの後半で十分に学習が進んでいるかを、ターゲット方向に対するバイアスと誤差の大きさの二つで評価することとした。ターゲット方向に対するカーソル軌道のバイアスは、符号付きの回転誤差の中央値で定量化できる。各セクション後半でのバイアスの大きさを加算したものを、その参加者のトータルのバイアス量とした。また、誤差の大きさ、つまり、カーソル軌道のばらつきの大きさは、回転誤差の絶対値の中央値で定量化できる。各セクション後半での誤差の大きさを加算したものを、その参加者のトータルの誤差量とした。

3. 結果

3.1 外傷調査結果

1年あたりの外傷発生件数は平均（±標準偏差） 8.31 ± 4.8 回/年であった。最多18回/年、最少2.4回/年と、ばらつきが大きかった。外傷発生件数に対する内的要因外傷の発生率は、 $24.0 \pm 11.2\%$ 、外的要因外傷の発生率は、 $48.0 \pm 15.4\%$ であった。内的要因と判断した受傷例としては、「技をかけにいった際に、軸足のハムストリングが伸びた」「技を裁くために片足跳びをした際、足関節が内反した」、また、外的要因と判断した受傷例としては、「うつ伏せの状態で相手から腰椎の伸展を強制された」といったものが挙げられる。なお、外傷の発生傾向は、柔道外傷調査のレビュー結果¹⁷やオリンピック出場レベルの柔道競技者を対象とした外傷調査¹⁸、大学柔道部員を対象とした外傷調査の結果^{19,20}と類似しており、外傷という観点では、今回の対象者は柔道競技者群として標準的であったといえる。

3.2 運動学習に伴う誤差の変化

図2は、回転変換が導入された直後（training1_ND_Rの最初の5試行）のカーソルの軌跡（波線）と、十分練習を繰り返したあと（training3_ND_Rの最後の10試行）のカーソルの軌跡（実線）の例を示す。導入直後には、ターゲット（黒丸）に対して軌跡が時計回りに回転しているが、学習後には、ほぼ真っ直ぐターゲットに向かってリーチしていることがわかる。

図3は、非利き手のセクションについて、全参加者の回転誤差の中央値を試行ごとにプロットし（灰色の点）、指数関数を当てはめたもの（実線）である。

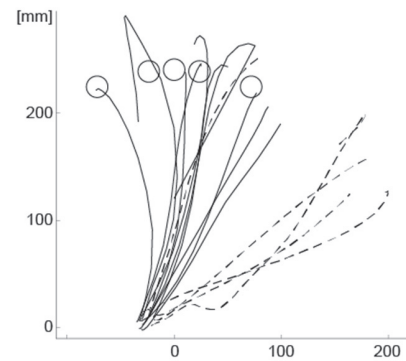


図2 カーソルの軌跡

波線：回転変換が導入された直後（training1_ND_Rの最初の5試行）のカーソルの軌跡。実線：十分練習を繰り返したあと（training3_ND_Rの最後の10試行）のカーソルの軌跡。○はターゲット位置を示す。

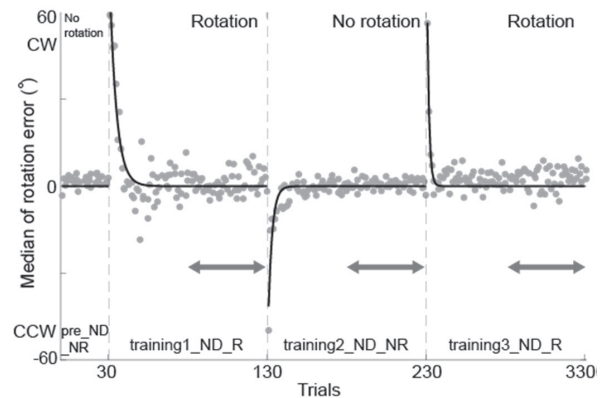


図3 回転誤差の試行数に伴う変化

正が時計回り方向（CW）、負が反時計回り方向（CCW）の誤差を示す。灰色点：全参加者の回転誤差の中央値。実線：回転誤差の中央値に当てはめた指数関数。両矢印は誤差量の算出に使用した範囲を示す。

過去の研究と同様に、誤差が指数関数的に減少すること、回転変換を外すと逆向き（負）の回転誤差が現れる残効（after effect）が観察されること、さらに回転を外した状態で学習（ウォッシュアウト；wash out）を続けると誤差が減少すること、再度回転変換を導入すると、再び大きな正の回転誤差が観察されるが、最初の回転変換導入時より速く誤差が減少すること、などがみて取れる。

3.3 外傷と運動学習能力の関係

各参加者について、運動学習能力の指標として、各セクションの後半（図3の両矢印の区間）の回転誤差からバイアス量と誤差量を算出した。バイアス量、誤差量がゼロに近いほど、ターゲットに対してより真っ直ぐリーチできるようになり、手先とカー

ソルの関係をよく学習していることを示す。なお、バイアス量がマイナスになる場合は、過学習していることを示す。

バイアス量、誤差量と、1年あたりの外傷発生件数、内的要因外傷の発生率、外的要因外傷の発生率との相関関係について調べた(ピアソンの相関係数)(図4)。バイアス量と1年あたりの外傷発生件数については、相関は有意ではなかった($r = -0.11$, $p = 0.680$)。バイアス量と内的要因外傷の発生率については有意な相関が見られ($p < .01$)、相関係数は0.61であった。一方で、外的要因外傷の発生率とは有意な相関は見られなかった($r = -0.31$, $p = 0.23$)。誤差量についても同様の結果であり、1年間の外傷発生件数および外的要因外傷の発生率とは有意な相関は見られなかった($r = -0.16$, $p = 0.55$, $r = -0.21$, $p = 0.41$)。一方で、内的要因外傷の発生率とは有意な相関が見られた($p = 0.011$, $r = 0.60$)。

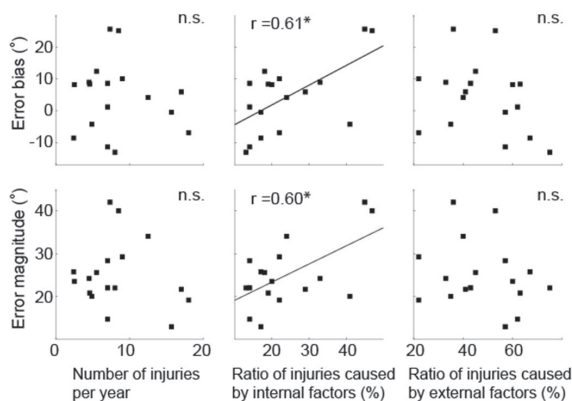


図4 外傷とバイアス量(上)、誤差量(下)の関係
左: 1年あたりの外傷発生件数。中: 内的要因外傷の発生率。右: 外的要因外傷の発生率。*: 多重比較(FDR)にて5%の有意水準で有意な相関

4. 考察

本研究では、外傷の予防法に新たなアプローチの可能性を提案することを目指し、アスリートの外傷と運動学習能力の関係について、予備的、探索的に検討した。その結果、外傷のうち、自身の姿勢やフォームの乱れといった、アスリート自身に要因を期することができる外傷の比率と、運動学習能力に関連がある可能性が示唆された。一方で、対戦相手によって強制的に力を加えられた、といった、不可抗力の外乱による外傷と運動学習能力の間には関係は見られなかった。今回の参加者においては、内的要因による外傷は平均24%と、それほど大きな比率

を占めるものではなかったが、40%を超える参加者も3名含まれており(41%, 45%, 47%)、このようなアスリートにとっては、内的要因による外傷を減らせるのは有意義であると推察される。一方で、外傷をこのような観点から分類した研究は他競技も含め例がない。本研究では、外傷の記述内容に基づき、1名の学生トレーナーが分類したが、今後は、客観的な分類、評価方法を検討する必要があるだろう。

本研究では、内的要因外傷は、「自分の体を思うように動かせなかった」「自分の体の動きが予想と違った」といった、自分自身の体についての運動意図と、運動結果の不一致に起因するものと想定した。これは、運動制御・学習の観点からみると、内部モデルが不正確、あるいは、内部モデルの学習が不十分である状態と解釈することが可能である。内部モデルとは、自分自身が動かしたい動き(目標軌道)に対してそれを実現する筋への適切な指令信号を計算するシステム(逆モデル)と、自分がある運動指令信号を出したとして、その結果、体がどのように動くのかをあらかじめ予測するシステム(順モデル)があり、そのどちらにも小脳が深く関わっていると考えられている^{21,22}。素早い運動を実現するためには、この両方が必要不可欠である。今回の視覚運動変換実験は、運動指令信号と運動結果の間に変換を加えることで、その二つの間の関係を取り持つ二つの内部モデルを新たな関係に合わせて調整する能力を評価するものである。このとき、誤差情報が重要な役割を果たす²³。したがって、今回得られた、内部モデルの学習能力を反映する視覚運動変換学習の成績が悪い人ほど内的要因外傷の発生率が高いという結果は、思った通りに体が動かないといった逆モデルの学習不良や、予想と違った動きになったというような順モデルの学習不良が、内的要因外傷の要因である可能性を示唆する。

今回使用した回転カーソル課題や、プリズム眼鏡などを使って視覚を左右に平行移動させるプリズム適応課題を使用して、小脳の運動学習能力を評価する研究はいくつか報告されている^{9,24}。しかし、それらは、主に、小脳疾患患者と健康者、若年健康者と高齢健康者といったグループ間での比較であり、個人の運動技能との関連を報告したものは見られない。一方で、アスリートの小脳の構造がコントロール

群と異なっているという報告があり^{10,11}，運動技能と小脳の関係を示唆している。プリズム適応を小脳機能評価システムとして使用する動きもあり，今後，健常者やアスリートも含めより広い母集団をターゲットとすることで，転倒や外傷のリスクを評価することが可能かもしれない。

今回の研究で興味深かったのは，競技歴が10年を超え，体育会に所属する，柔道ではエリートであるアスリートにおいても，回転カーソル課題が得意な人とそうではない人がいたところである。柔道の技能そのものと，感覚運動変換に対する適応能力は，必ずしも一致しない可能性があることが示唆される。今後，柔道の技能レベルとの直接的な比較や，アスリートではない健常者のパフォーマンスとの比較などが求められる。

今回の研究では，柔道競技しか対象としておらず，また，同様の実験を他の競技で実施した先行研究はない。したがって，今回得られた，内的要因による外傷と運動学習能力の関係は，柔道という競技の特性によるのである可能性も高い。類似の格闘技においても共通する結果が得られるのか，球技など道具をつかう競技においても類似の結果が得られるのかなど，今後，さらに検討を進める必要がある。

今回の結果から，運動器だけでなく，脳機能を意識した介入が外傷予防に有用である可能性が示唆された。脳機能の観点から外傷を理解することがその予防につながると有意義であろう。

5. 謝辞

早稲田大学人間科学研究科修士課程の栗原勇人氏，高橋友太氏には，実験および解析ご協力いただきました。早稲田大学人間科学学術院助手の高橋徹氏には，有益なコメントをいただきました。外傷調査にご協力いただきました早稲田大学体育会柔道部学生トレーナー，本研究の実験に参加頂いた早稲田大学在学学生に，深く感謝申し上げます。本研究は，JSPS科研費17H02128，20H05482の助成を受けたものです。

6. 引用文献

1. Herman, K., Barton, C., Malliaras, P. & Morrissey, D. The effectiveness of

neuromuscular warm-up strategies, that require no additional equipment, for preventing lower limb injuries during sports participation: a systematic review. *BMC Med* 10, 75 (2012).

2. Hubscher, M., et al. Neuromuscular training for sports injury prevention: a systematic review. *Med Sci Sports Exerc* 42, 413-421 (2010).
3. Soligard, T., et al. Comprehensive warm-up programme to prevent injuries in young female footballers: cluster randomised controlled trial. *Bmj* 337, a2469 (2008).
4. Cholewicki, J., et al. Delayed trunk muscle reflex responses increase the risk of low back injuries. *Spine (Phila Pa 1976)* 30, 2614-2620 (2005).
5. Wojtys, E.M., Huston, L.J., Taylor, P.D. & Bastian, S.D. Neuromuscular adaptations in isokinetic, isotonic, and agility training programs. *Am J Sports Med* 24, 187-192 (1996).
6. Magnusson, M.L., et al. European Spine Society--the AcroMed Prize for Spinal Research 1995. Unexpected load and asymmetric posture as etiologic factors in low back pain. *Eur Spine J* 5, 23-35 (1996).
7. Johnson, J.F., Belyk, M., Schwartz, M., Pinheiro, A.P. & Kotz, S.A. The role of the cerebellum in adaptation: ALE meta-analyses on sensory feedback error. *Human brain mapping* 40, 3966-3981 (2019).
8. Izawa, J., Criscimagna-Hemminger, S.E. & Shadmehr, R. Cerebellar contributions to reach adaptation and learning sensory consequences of action. *J Neurosci* 32, 4230-4239 (2012).
9. Hashimoto, Y., et al. Quantitative evaluation of human cerebellum-dependent motor learning through prism adaptation of hand-reaching movement. *PLoS One* 10, e0119376 (2015).
10. Park, I.S., Lee, Y.N., Kwon, S., Lee, N.J. & Rhyu, I.J. White matter plasticity in the cerebellum of elite basketball athletes. *Anat*

- Cell Biol 48, 262-267 (2015).
11. Park, I.S., Lee, N.J. & Rhyu, I.J. Roles of the Declive, Folium, and Tuber Cerebellar Vermian Lobules in Sportspeople. *J Clin Neurol* 14, 1-7 (2018).
12. Krakauer, J.W. Motor learning and consolidation: the case of visuomotor rotation. *Adv Exp Med Biol* 629, 405-421 (2009).
13. Huberdeau, D.M., Krakauer, J.W. & Haith, A.M. Practice induces a qualitative change in the memory representation for visuomotor learning. *J Neurophysiol* 122, 1050-1059 (2019).
14. 越田, 専. 柔道における肩・肘の傷害と予防方策の提案. *日本アスレティックトレーニング学会誌* 4, 121-126 (2019).
15. 財団法人日本体育協会. 公認アスレティックトレーナー専門科目テキスト(5)検査・測定と評価, (2007).
16. Starkey, C., Brown, S.D. & Ryan, J. 整形外科・スポーツ傷害診察ハンドブック, (2012).
17. Pocecco, E., et al. Injuries in judo: a systematic literature review including suggestions for prevention. *Br J Sports Med* 47, 1139-1143 (2013).
18. Kim, K.S., Park, K.J., Lee, J. & Kang, B.Y. Injuries in national Olympic level judo athletes: an epidemiological study. *Br J Sports Med* 49, 1144-1150 (2015).
19. 小山, 泰., 下川, 哲., 西田, 孝. & 斉藤, 仁. 大学柔道部部員の傷害調査の考察. *武道学研究* 18, 73-74 (1985).
20. 小山, 泰., 下川, 哲., 西田, 孝., 斉藤, 仁. & 藤巻, 昌. 大学柔道部部員の傷害調査の考察 (その2). *武道学研究* 19, 163-164 (1986).
21. Wolpert, D.M., Miall, R.C. & Kawato, M. Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences* 2, 338-347 (1998).
22. Imamizu, H., et al. Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature* 403, 192-195 (2000).
23. Inoue, M., Uchimura, M. & Kitazawa, S. Error Signals in Motor Cortices Drive Adaptation in Reaching. *Neuron* 90, 1114-1126 (2016).
24. Hanajima, R., et al. Modulation of error-sensitivity during a prism adaptation task in people with cerebellar degeneration. *J Neurophysiol* 114, 2460-2471 (2015).

